多丝结构气体探测器研究

张春雷[1,2]，曹李刚[1,2]，黄建微[3]，张耀锋[1,2,†]

(1.北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875；

2.射线束技术与材料改性教育部重点实验室,北京师范大学，北京 100875

3.中国计量科学研究院电离辐射研究所，北京 100013)

摘要： 多丝结构气体探测器具有耐辐射、响应快、灵敏区大、易于建造等优势而广泛应用于核物理和核技术领域。介绍了多丝结构气体探测器的电场计算理论方法，并利用有限元程序 ANSYS 及探测器模拟程序 GARFIELD 进行了多丝结构气体探测器漂移区、雪崩放大区的电场优化设计。此外，结合 GEANT4 程序进行了宇宙射线入射气体探测器的模拟计算，获得了探测器电流、电压以及输出波形积分电荷的统计结果。在此基础上进行了气体探测器的研制，并用于宇宙射线的测试实验，实验结果与模拟结果基本一致。论文提出的模拟计算方法及实验技术完全可用于多丝结构气体探测器的优化设计及实验评估，为类似探测器及实验提供借鉴。

关键词： 多丝结构气体探测器；电场计算；探测器模拟；宇宙射线测量；

中图分类号： TL811；TL815　　**文献标志码：** A　　**doi：**

1　引言

气体探测器具有耐辐射、响应快、灵敏区大、成本相对低廉、易于建造等优势在核物理和核技术领域具有广泛的应用。如各种形式的气体电离室、具有二维位置分辨的多丝正比室探测器、采用 GEM 等放大结构的气体探测器、具有三维位置分辨的时间投影气体探测器等，这些探测器在辐射剂量测量、辐射成像、核物理实验、宇宙射线研究等科研领域发挥着重要的作用[1-3]。多丝结构气体探测器是在电离室基础上发展起来的、利用多根细丝电极实现电离信号放大及收集功能的气体探测器，能够依据细丝电极的位置及其他技术手段实现入射粒子电离位置的二维分辨测量，从而获得入射粒子的径迹信息。如引入外部触发时间信息，则可以实现入射粒子的 3 维径迹测量，进而实现粒子类型鉴别等功能，即为时间投影气体探测器，在核物理及高能物理实验领域有着重要的应用，如 STAR-TPC、ALEPH-TPC、SπRIT-TPC 等[4-6]。

论文基于气体探测器的电场计算理论，利用气体探测器模拟程序 GARFIELD 和有限元程序 ANSYS 开展了气体探测器的模拟优化工作，并进行了探测器的研制。利用该探测器开展了地面宇宙 μ 子测量实验，获得了探测器输出电压波形及积分电荷的统计结果。探测器能够长期稳定运行，且实验结果与模拟计算结果符合良好。论文提出的模拟计算方法及实验技术完全可用于多丝结构气体探测器的优化设计及实验评

收稿日期： 2023-06-25; **修改日期：** 2023-12-14

基金项目： 国家自然科学基金(编号 11605009)； 计量与校准技术国防科技重点实验室开放课题(JLKG2022001C003)

作者简介： 张春雷，男，汉族，内蒙古乌兰察布，高级工程师，博士，从事核技术及核物理研究；**E-mail:** lei@bnu.edu.cn

[†]**通信作者：** 张耀锋，**Email:** zhangyf10@bnu.edu.cn

估，为类似探测器及实验提供借鉴。

2　多丝结构气体探测器模拟优化

2.1　多丝电极电场计算理论

多丝结构气体探测器一般由漂移区和雪崩放大区组成。在漂移区内，入射粒子发生电离作用，产生初始电子-离子对，电离电子在外部电场的作用下向雪崩放大区域移动并被收集。漂移区需要施加与电离电子漂移方向平行的强的均匀电场，以确保探测器具有快的响应时间并抑制横向扩散效应；雪崩放大区利用直径约为几十 μm 细丝电极表面产生的强电场，实现电离电子的雪崩放大及信号收集[7]。多丝结构气体探测器雪崩放大区一般由等间距排列的多根细丝电极组成阳极丝平面。为了保证每根细丝电极周围电场的一致性，在雪崩放大区常常添加具有类似排列结构的接地细丝电极平面阵列以及具备触发控制功能的栅极细丝电极平面阵列。典型的多丝结构气体探测器结构如图 1 所示。

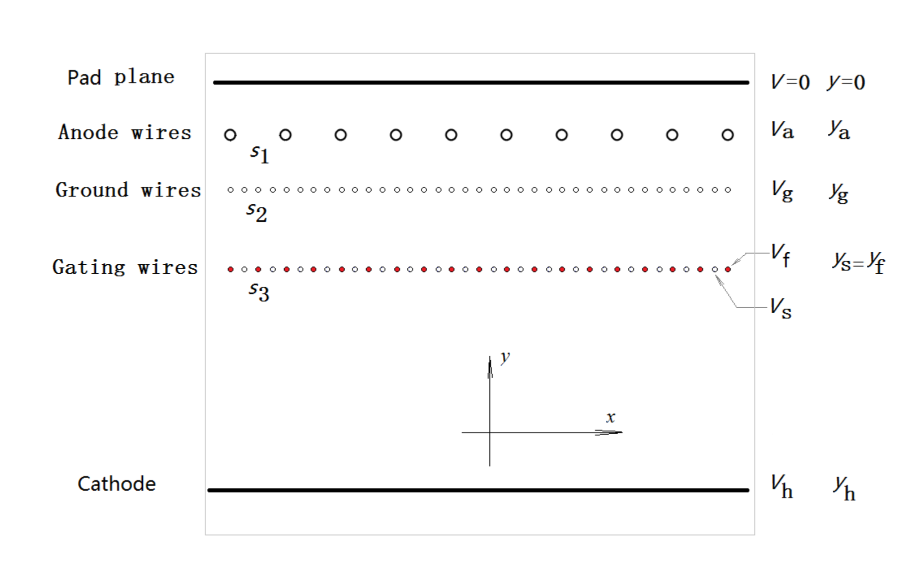


图 1 典型的多丝结构气体探测器电极布局图

细丝电极阵列在其周围区域产生的电场电势在理想情况下（纵向 z 方向无限长）可以由有每根细丝电极及相关的平面电极单元的贡献叠加得到，并可基于此推导出电场的分布。如对于单层具有无限多数目的细丝电极阵列及单一接地电极板单元组成的简单模型，则其电势及电场分布可以表述为[8]：

$$
\begin{aligned}
&V(x,y)=-\frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\ln\frac{\sin^2[(\pi/s)(x-x_0)]+\sinh^2[(\pi/s)(y-y_0)]}{\sin^2[(\pi/s)(x-x_0)]+\sinh^2[(\pi/s)(y+y_0)]}\\
&E_x(x,y)=\frac{\lambda}{2s\varepsilon_0}\sin[\frac{2\pi}{s}(x-x_0)]\cdot(\frac{1}{A_1}-\frac{1}{A_2})\\
&E_y(x,y)=\frac{\lambda}{2s\varepsilon_0}(\frac{\sinh[\frac{2\pi}{s}(y-y_0)]}{A_1}-\frac{\sinh[\frac{2\pi}{s}(y+y_0)]}{A_2})\\
&A_1=\cosh[\frac{2\pi}{s}(y-y_0)]-\cos[\frac{2\pi}{s}(x-x_0)]\\
&A_2=\cosh[\frac{2\pi}{s}(y+y_0)]-\cos[\frac{2\pi}{s}(x-x_0)]
\end{aligned}
\tag{1}
$$

其中，接地电极板处于 y=0、细丝电极处于 $x=x_0+k\times s$、$y=y_0$ 位置，s 为细丝电极阵列在 x 方向的间距，k 为细丝电极的编号，λ 为电极表面的电荷密度。由式（1）可知，细丝电极周围电场除了与电极结构位置有关外，还主要依赖于电极表面的电荷密度 λ。

将上述理论应用到图 1 所示的多丝结构探测器中，并将各组细丝电极以及阴极板单元的施加电势作为

边界条件，可以得到：

$$
\begin{aligned}
V_a &= \frac{\lambda_a y_a}{\varepsilon_0 s_1}(1-\frac{s_1}{2\pi y_a}\ln\frac{2\pi r_a}{s_1})+\frac{\lambda_g y_a}{\varepsilon_0 s_2}+\frac{\lambda_s y_a}{\varepsilon_0 s_3}+\frac{\lambda_f y_a}{\varepsilon_0 s_3}+\frac{\sigma_h y_a}{\varepsilon_0} \\
V_g &= \frac{\lambda_a y_a}{\varepsilon_0 s_1}+\frac{\lambda_g y_g}{\varepsilon_0 s_2}(1-\frac{s_2}{2\pi y_g}\ln\frac{2\pi r_g}{s_2})+\frac{\lambda_s y_g}{\varepsilon_0 s_3}+\frac{\lambda_f y_g}{\varepsilon_0 s_3}+\frac{\sigma_h y_g}{\varepsilon_0} \\
V_s &= \frac{\lambda_a y_a}{\varepsilon_0 s_1}+\frac{\lambda_g y_g}{\varepsilon_0 s_2}+\frac{\lambda_s y_s}{\varepsilon_0 s_3}(1-\frac{s_3}{2\pi y_s}\ln\frac{2\pi r_s}{s_3})+\frac{\lambda_f y_s}{\varepsilon_0 s_3}(1-\frac{s_3}{2\pi y_s}\ln 2)+\frac{\sigma_h y_s}{\varepsilon_0} \\
V_f &= \frac{\lambda_a y_a}{\varepsilon_0 s_1}+\frac{\lambda_g y_g}{\varepsilon_0 s_2}+\frac{\lambda_s y_s}{\varepsilon_0 s_3}(1-\frac{s_3}{2\pi y_s}\ln 2)+\frac{\lambda_f y_s}{\varepsilon_0 s_3}(1-\frac{s_3}{2\pi y_s}\ln\frac{2\pi r_f}{s_3})+\frac{\sigma_h y_s}{\varepsilon_0} \\
V_h &= \frac{\lambda_a y_a}{\varepsilon_0 s_1}+\frac{\lambda_g y_g}{\varepsilon_0 s_2}+\frac{\lambda_s y_s}{\varepsilon_0 s_3}+\frac{\lambda_f y_s}{\varepsilon_0 s_3}+\frac{\sigma_h y_h}{\varepsilon_0}
\end{aligned}
\tag{2}
$$

其中，λ_a、λ_g、λ_s、λ_f、σ_h 分别为各细丝电极单元及阴极板的电荷密度；r_a、r_g、r_s、r_f 为各组细丝电极的半径。通过求解（2）式的方程，可以得到各单元的电荷密度，并基于公式（1）求出最终的探测器电场分布。

2.2 探测器模拟优化

实际的探测器采用有限数目的细丝电极建造，因而其电场分布结果与式（2）计算结果存在一定偏差。工作中常常采用探测器模拟程序进行模拟优化。GARFIELD 程序是由 CERN 开发的一款用于气体探测器的从电场计算、气体介质模拟、电子漂移及雪崩过程模拟以及后续电流响应计算等具有诸多功能的模拟程序[9]。GARFIELD 程序在电场计算方面主要用于探测器的二维电场计算，仅能用于探测器纵向中心平面处的模拟计算，无法实现模拟结果对探测器纵向范围内的全区域覆盖。我们利用有限元程序 ANSYS 进行多丝结构探测器的三维电场计算，并将电场计算结果读入 GARFIELD 程序，以实现 GARFIELD 程序对于探测

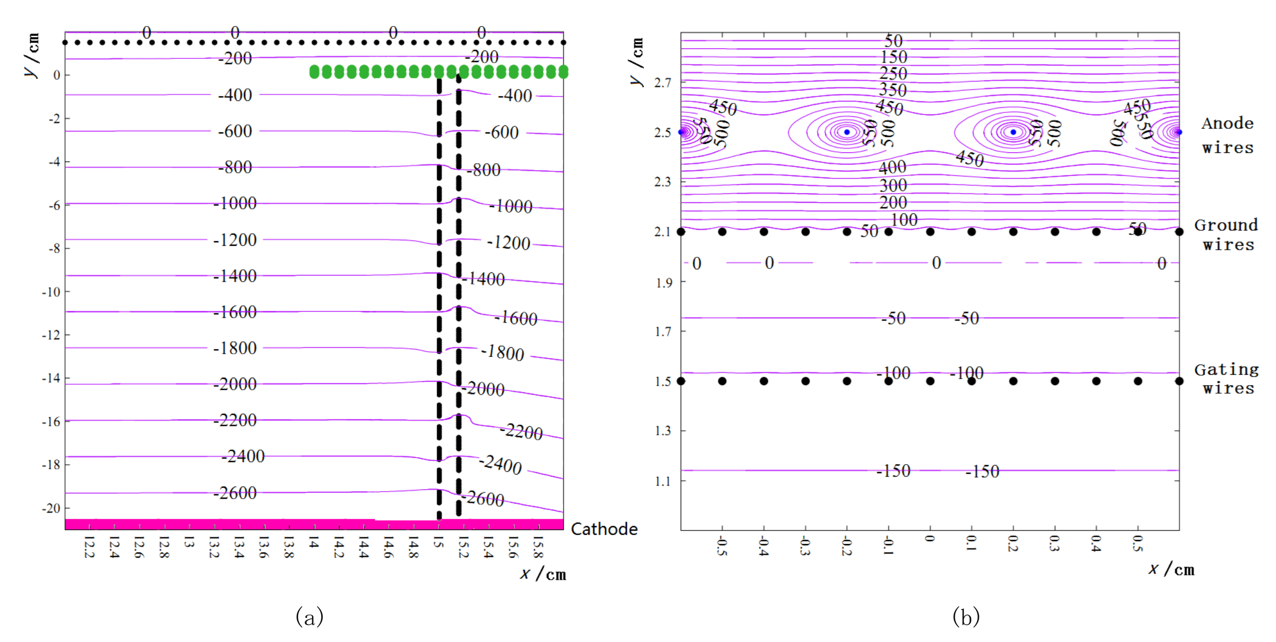
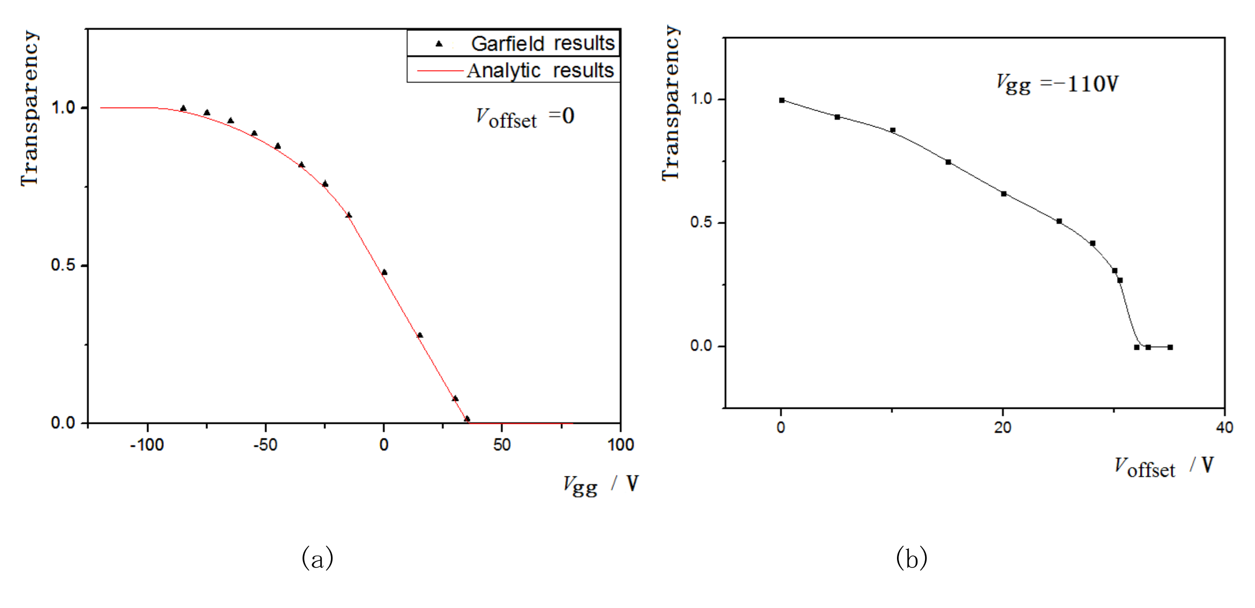


图 2 多丝结构气体探测器电场模拟结果 (a)为漂移区等电势分布图；(b)为雪崩区等电势分布图。

器的三维电场模拟优化。对 GARFIELD 程序进行了修改编译，实现了对于电场数据的快速简便读入；与此同时，引入了新的插值方法[10,11]，修正了原始程序针对细丝电极周围电场插值处理时出现的错误，获得

了准确、连续的电场分布，以确保后续探测器漂移及雪崩模拟过程的顺利进行。针对图 1 所示的探测器结构，模拟计算得到的中心平面处漂移区与雪崩放大区电场分布如图 2 所示。

为了减小外部干扰并提高探测器运行效率，多丝结构气体探测器通过加入栅极细丝以实现外部信号的触发控制。栅极细丝电极依照排列计数分为奇偶两组，需要时在奇数组与偶数组之间施加一定的偏压，从而在临近区域产生 x 方向的横向电场，以阻断电离电子进入雪崩放大区域，使得探测器处于关闭状态。通过外部触发信号控制栅极电极偏压的施加，即可实现对于探测器开关状态的触发控制。不同的电势条件下电离电子具有不同的透过率，因而探测器需要选择合适的栅极细丝电极电势和偏压值。理论计算表明，电离电子的透过率为 $T=1-\frac{\sigma_g^+}{|\sigma_p|}$，其中 σ_g^+、σ_p 分别为栅极电极正电荷和阴极板的电荷密度[8]；利用 GARFIELD 程序对不同栅极电压条件下的探测器透过率进行模拟计算，模拟结果和理论解析计算结果对比如图 3(a)所示，两者基本一致。图 3(b)则给出了不同偏压条件下的电离电子透过率计算结果。结果表明，栅极电极电势为-110V、偏压应在 35V 以上，才能实现探测器的有效外部触发控制。经过多次模拟优化，最终设计的探测器参数如表 1 所示。



(a) (b)

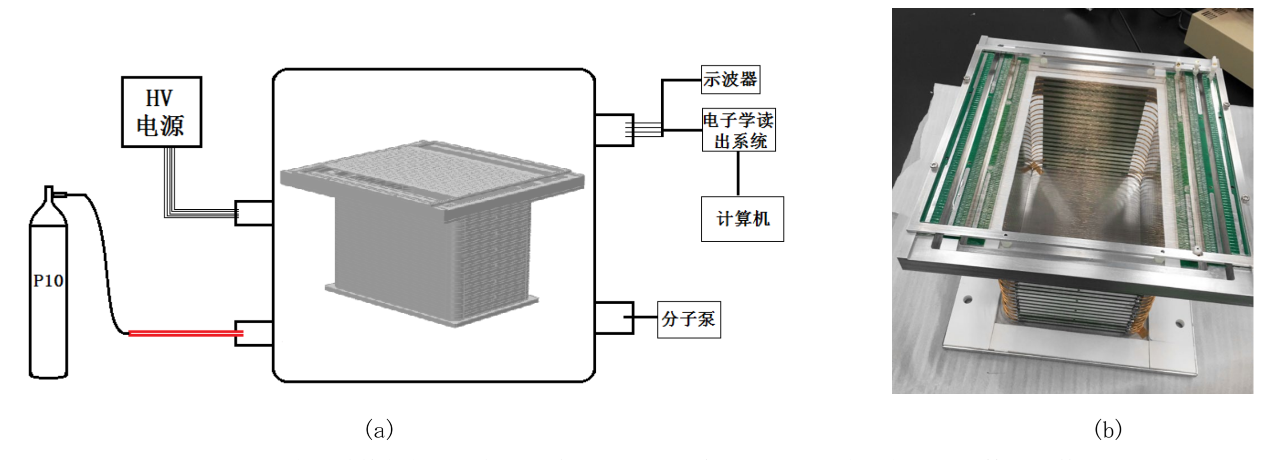
图 3 探测器栅极电极电势模拟结果。(a) 偏压为 0，不同栅极电势下电子透过率模拟结果与理论计算结果比较；(b) 不同

表 1 模拟优化的多丝结构气体探测器参数表

	电势	位置	间距	半径
Pad plane	0 V	y=2.9 cm		
阳极细丝电极	1400 V	y_a=2.5 cm	4 mm	25 μm
接地细丝电极	0 V	y_g= 2.1 cm	1 mm	75 μm
栅极细丝电极	-110 V（偏压±35 V）	y_s= 1.5 cm	1 mm	75 μm
漂移区电场		120 V/cm		

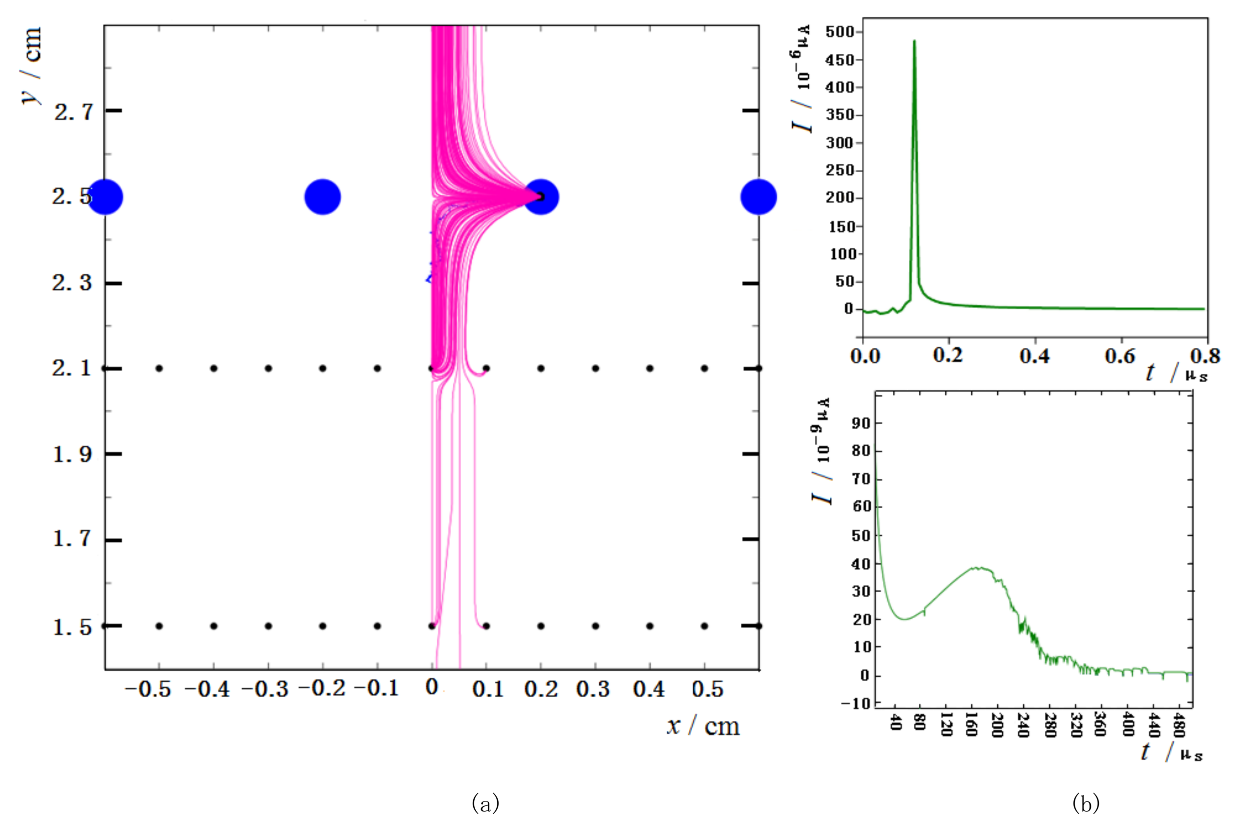
3　多丝结构气体探测器研制及实验

基于表 1 的探测器参数，开展了多丝结构气体探测器研制。探测器系统如图 4 所示。探测器场笼结构采用印刷电路板（PCB）制作。在印刷电路板上印制宽度为 6 mm、间距为 4 mm 的覆铜金属条带，并施加等梯度的电势，用于获得具有均匀漂移电场的探测器漂移区。雪崩区阳极细丝电极选用镀金钨丝，接地和



(a) (b)

图 4 (a)多丝结构气体探测装置示意图；(b) 包含漂移区及雪崩区的探测器核心硬件



(a) (b)

图 5 单粒子入射探测器探测器模拟结果图 (a)为电离电子引起的雪崩过程 (b)为探测器输出电流信号模拟结果，上图为雪崩电子产生的电流，下图为雪崩离子运动产生的电流

栅极细丝电极选用铍铜丝；细丝电极施加一定张力，焊接在设计的 PCB 电极连接板上。在探测器顶部安装了 Pad 接收板部件，并通过绝缘端子连接至外部电子学系统或进行示波器采样。探测器气体介质选用 90%Ar+10%CH_4 的氩甲烷气体（P10）。探测器主体置于真空腔内，系统预先进行抽气，直至真空度达到约

10^{-3}Pa，然后充入 P10 气体至一个大气压。在施加各组高压电势后，探测器即可开展探测实验。

宇宙射线经过地球大气簇射后，绝大部分近地表入射粒子为 μ 子，其能量范围较宽，平均能量约为 3-4GeV，能够穿透探测器外围真空腔，被探测器测量。利用设计的多丝结构气体探测器，开展了宇宙射线 μ 子探测实验。实验过程中，采用示波器对 Pad 接收板输出信号进行直接电压波形采样，以避免电子学读出系统处理过程带来的波形畸变。 同时，结合蒙特卡洛程序 GEANT4，进行了相应测量过程的模拟计算。依据国外相关研究机构测量的宇宙 μ 子能谱数据[12]，进行入射粒子能量采样，模拟获得探测器中发生电离时的位置及电离电子数目。之后，将相关数据输入 GARFIELD 程序中，进行探测器的输出响应模拟。其中单粒子入射探测器引起的雪崩效应以及对应阳极 Pad 平面获得的电流信号如图 5 所示。可知，雪崩电子漂移速度较快，对应的电流信号幅度较大，但持续时间较短。而电离离子运动速度较小，对应电流信号幅度较小，信号能够长时间持续存在。由于采用 Pad 结构进行信号输出，实验过程中电离离子一部分向 Pad 接收板方向运动，另一部分则反向向着接地细丝电极移动。实际输出信号为极性相反的这两部分信号的叠加结果。基于模拟得到的电流信号和外部电路的阻容参数，获得单次粒子入射探测器得到的脉冲电压波形模拟结果，与测量结果基本一致。

由于入射 μ 子具有宽能谱、其在探测器中发生电离时的能量沉积波动效应以及探测器中气体放大倍数的波动性，探测器输出电压脉冲波形幅度具有较大的变化范围。鉴于此，对探测器实验输出波形进行采集、积分处理，获得的每个入射事例在探测器中的积分电荷统计结果。同时，利用 GARFIELD 程序进行 μ 子入射探测器的模拟计算，获得了探测器针对 μ 子电离事件的积分电荷模拟计算结果。两者对比如图 6 所示。可知，探测器输出结果与模拟结果符合很好，说明本项研究提出的探测器设计优化方法切实有效，研制的探测器工作正常，测量结果真实可信。

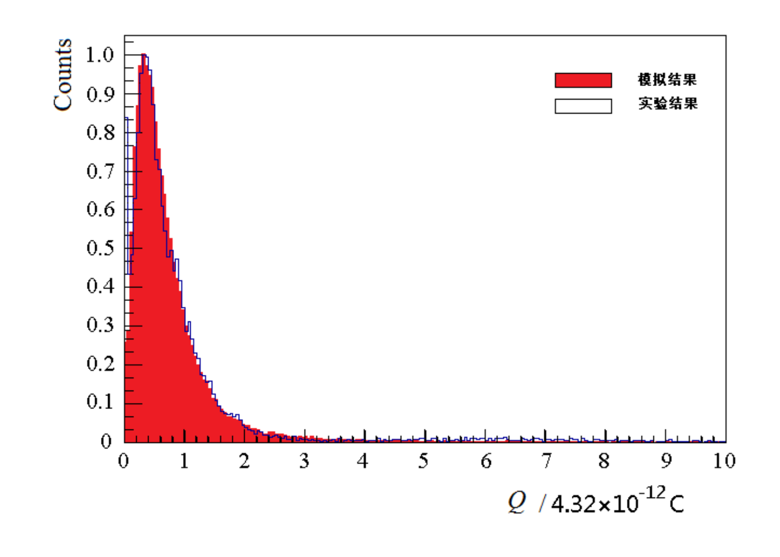


图 6 探测器测量 μ 子的积分电荷统计结果与模拟结果对比

4 总结

基于多丝结构气体探测器的电场计算理论及探测器模拟程序 GARFIELD，开展了探测器的设计工作。通过对多丝电极阵列的电场模拟计算，获得了适宜的探测器结构及电势参数。在此基础上，进行了探测器的研制。利用 PCB 电路板建造了探测器漂移区，并探索了探测器雪崩放大区多丝电极阵列的焊接、固定、

张力施加等工艺技术。利用研制的探测器进行了宇宙入射 μ 子的测量实验，并进行了响应的模拟研究。实验测量得到的脉冲波形积分电荷统计结果与模拟计算结果符合很好。论文提出了适用于多丝结构气体探测器的研制方法及工艺技术，可用于类似的气体探测器以及 TPC 探测器的研制。

参考文献：

[1] CHARPAKA G, DERRE J, GIOMATARISB Y, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, 478: 26–36

[2] SAULI F. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016, 805: 2–24

[3] VARGA D, GAL Z, HAMAR G, et al. European Journal of Physics, 2015, 36: 065006. doi:10.1088/0143-0807/36/6/065006

[4] IGO G, HUANG H, HARPER G, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: 2003, 499:659–678.

[5] ATWOOD W B, BARCZEWSKI T, BAUERDICK L A T, et al. Nuclear Instruments and methods in physics research A: Accelerators, spectrometers, detectors, and associated equipment, 1991, 306(3): 446.

[6] SHANE R, MCINTOSH A B, ISOBE T, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors, and Associated Equipment, 2015, 784: 513

[7] SAULI F. Principles of operation of multi-wire proportional and drift chambers[EB/OL]. 2023-06-05. http://web.ihep.su/spitsky/mipt/literature/src/hep/Sauli_7708272.pdf.

[8] BLUM W, ROLANDI L, RIEGLER W. Particle detection with drift chambers[M]. Berlin Herdelberg, Springer-Verlag, 2008: 105-117.

[9] VEENHOF R. Garfield simulation program[EB/OL]. 2018-07-01. http://garfield.cern.ch/garfield.

[10] RENKA R J. Acm Transactions on Mathmaticla Software, 1988, 14(2):151-152

[11] ZHANG Yaofeng, YIN Yuan, ZHANG Chunlei, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(12): 2454-2459(in Chinese).

(张耀锋， 尹远，张春雷，等。原子能科学与技术， 2019, 53(12): 2454-2459. Doi: 10.7538/yzk.2018.youxian.0929)

[12] SATO T. PLoS One, 2015,10(12):e0144679.

Studies on multi-wire gaseous detectors

ZHANG Chunlei[1,2]，CAO Ligang[1,2], Huang Jianwei[3]， ZHANG Yaofeng[1,2†]

(1. College of nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing, 100875，Beijing，China

2. Key laboratory of Beam technology and Material Modification of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing, 100875, Beijing, China

3. Institute of Ionizing Radiation Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: Multi-Wire gaseous detectors have been widely used in the fields of nuclear physics and nuclear technology for their advantages of radiation hardness, fast respond, large sensitive area, relative low cost, easily built and so on. The electric field calculation theories for multi-wire gaseous detector will be introduced first, and then GRFIELD, a professional gaseous detector simulation program, will be used to carry out the electric field calculations in the drift region and avalanche region together with ANSYS, which is a famous finite element analysis commercial program. Furthermore, the designed gaseous detector has also been simulated in the case of cosmic ray irradiation by a Monte Carlo program of GEANT4. The output results of current pulses, voltage pulses, and the integrated charge for each event of the detector has been achieved. And then, a multi-wire gaseous detector has been built and used to carry out the real measurements for the cosmic rays. The experiment results agree well with the previous simulations. The simulation methods and the related experiments technologies in this study will help to do design works and experiment pre-evaluations for similar gas detectors.

Key words：Multi-wire gaseous detector; Electric field calculations; Detector simulations; Cosmic ray measurements

---

Received date：2023-06-25; **Revised date**：2023-12-14

Foundation item： National nature science foundation of China(No. 11605009); Opening foundation of national defense science and technology key laboratory of Metrology and Calibration Techniques (JLKG2022001C003)

†**Corresponding author**:ZHANG Yaofeng, E-mail: zhangyf10@bnu.edu.cn